砂岩蠕变破裂多尺度演化试验研究

赵娜,张怡斌,王来贵

(辽宁工程技术大学力学与工程学院,123000 阜新)

摘　要:岩石随着外载荷的增大发生变形和破坏,当外载荷保持不变时,变形并未停止,仍会持续增加,发生蠕变变形,其根本原因是岩石的非均匀性。岩石蠕变破裂是由岩石内部原始非均匀性引起的微观尺度破裂、细观尺度裂纹扩展和贯通、宏观尺度变形增大和破坏的过程,因此需要对岩石蠕变破裂的多尺度演化机理进行研究。本研究以砂岩为研究对象,从蠕变破裂宏观演化试验和破裂断口微细观扫描试验出发,分析砂岩试样不同尺度变形破裂机理。通过砂岩蠕变破裂宏观演化试验可以看出,在初始蠕变和等速蠕变阶段,岩石表面无裂纹,主要为微、细观裂纹的萌生和扩展。当宏观破裂面形成后进入加速蠕变阶段,在加速蠕变阶段,沿破裂面产生摩擦滑动,最终发生破坏。通过对典型破裂断口的微、细观结构特征分析及不同分析点位的组成成分和元素特征分析可以得出,岩石微观孔隙、裂隙等缺陷发育的结构非均匀性和组成成分的非均匀性是造成砂岩微观破裂和细观裂纹扩展的主要原因。多尺度分析的结果直观的反映了岩石内部裂纹扩展空间位置和扩展方向。这对深入研究岩石蠕变破裂演化机理是十分有意义的。

关键词:多尺度;蠕变破裂;演化规律;非均匀性

中图分类号:TU45　　**文献标志码:**A

Experimental study on multi-scale creep rupture evolution of sandstone

ZHAO Na,ZHANG Yibin,WANG Laigui

(College of Mechanics and Engineering,Liaoning Technical University,123000 Fuxin,China)

Abstract: Rock deformation and failure occur with the increase of external load. When the external load remains unchanged,the deformation does not stop,and it will continue to increase,resulting in creep deformation. The fundamental cause is the heterogeneity of rock. Rock creep fracture is a process of micro-scale fracture,meso-scale crack propagation and penetration,macro-scale deformation increase and failure process caused by the original heterogeneity of rock. Therefore,it is necessary to study the multi-scale evolution mechanism of rock creep fracture. Taking sandstone as the research object,this paper analyzes the deformation and fracture mechanism of sandstone samples at different scales from the macro-evolution experiment of creep fracture and the micro-scanning experiment of fracture. Through the macroscopic evolu-

收稿日期:2021-02-19　　**修回日期:**2021-04-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFC1503101);辽宁省重点科技创新基地联合开放基金资助项目(No. 2020-KF-13-06);辽宁省教育厅资助项目(No. LJ2020JCL013)

通信作者:张怡斌。E-mail:2661426194@ qq. com

引用格式:赵娜,张怡斌,王来贵. 砂岩蠕变破裂多尺度演化试验研究[J]. 应用力学学报,2023,40(1):87-95.

ZHAO Na,ZHANG Yibin,WANG Laigui. Experimental study on multi-scale creep rupture evolution of sandstone[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):87-95.

tion experiment of sandstone creep fracture, it can be seen that there are no cracks on the surface of rock in the initial creep and constant velocity creep stages, but mainly the initiation and propagation of micro- and micro-cracks. When the macro-fracture surface is formed, it enters the accelerated creep stage. In the accelerated creep stage, friction sliding occurs along the fracture surface, and finally failure occurs. The microscopic analysis of the micro-composition and fracture characteristics of the sandstone can be obtained by analyzing the micro-composition and micro-fracture characteristics of the sandstone. The results of multi-scale analysis directly reflect the spatial position and direction of crack propagation in rock. This is of great significance for further study of the evolution mechanism of rock creep rupture.

Key words: multi-scale; creep rupture; evolution law; non-uniformity

岩石是组成地壳岩石圈的主要物质,众多工程问题离不开岩石。岩石微细观结构非均匀性是造成岩石强度差异的主要原因[1]。因此,不同尺度岩石的组成、结构以及由此引起的变形和破裂机制等受到了众多岩石力学工作者的重视。目前,对于岩石破裂较通用的尺度划分为:细观 0.01 ~ 1 mm,微观小于 0.01 mm,宏观大于 1 mm[2]。学者们分别从微观、细观和宏观尺度研究岩石的破裂特征,并试图建立各尺度之间的联系。岩石多尺度模型一直是学者们研究的热点,YU 等[3]基于分层方法,描述了一种用于此类大规模建模的新颖多尺度方法,在不丢失原始微观 CT 图像任何信息的情况下,该方法使用混合理论在多级上提取等效的岩石电特性,并在不同级别上,级联所有结果以实现总体岩石特性;于庆磊等[4]通过数值试验研究岩石细观结构对其变形和强度的影响;丛宇[5]从宏观角度采用多种方法分析岩石的卸荷破坏特征并利用数值模拟从细观角度深度分析岩石卸荷破坏过程;彭超[6]以岩质高陡边坡为研究对象,从连续-非连续、宏观-细观的角度,分析边坡岩体的宏细观力学特征和开挖扰动条件下的边坡稳定性。

岩体由多种矿物组成,同时包含孔隙、裂隙等结构面,非均匀性是其区别于其他材料的最主要的特性。岩体的非均匀特性主要体现在两个方面:组成成分的非均匀和结构的非均匀。WEIBULL[7]最初提出了用概率统计的方法描述岩石的非均匀性,他认为岩石最薄弱处的破坏将会导致整体的变形破坏,因此采用具有门槛值的幂函数来描述岩石强度极值分布规律。前苏联学者沃尔科夫[8]认为非均匀材料的变形破裂累积到一定程度后材料才会发生宏观破裂,并利用正态分布函数推导出了破裂发生概率。此后,国内外学者基于 WEIBULL 和沃尔科夫的理论基础上进行大量研究,如宋义敏等[9]基于岩石滑动变形场的非均匀特征,采用数字散斑为观测手段,研究了岩石滑动变形过程中变形场非均匀统计指标、滑动面滑动速度和变形能密度等规律。赵娜等[10]根据裂纹扩展的内外区概念,引入内动力理论,选定含有预制裂纹的岩石材料,分析了非均匀岩石材料裂纹扩展及演化规律。于庆磊等[11]依据数字图像处理理论,研发出一种基于数字图像的岩石非均匀性表征技术;刘建等[12]以有限差分法(FDM)为计算框架,利用 WEIBULL 分布描述细观单元弹性模量和单轴抗压强度的分布特征,采用弹塑性应变软化本构模型描述细观单元的力学响应,进而建立一种模拟非均匀岩石介质破裂的数值模型。采用该数值模型探讨了单轴压缩时细观均质度 m 及细观结构对数值试样宏观特性的影响。尹崧宇等[13]结合数值模拟和实验研究,采用有限元和统计技术的方法,建立岩石的二维模型,引入损伤增量因子的概念,分析岩石非均匀性对岩石裂纹扩展过程的影响。关于岩石蠕变变形的研究也一直是热点问题[14-17]。现有研究多是从连续介质力学出发,从宏观唯象学的角度进行分析,通过弹性、黏性元件建立模型,实际岩石的蠕变变形是由微观破裂、细观裂纹扩展再到宏观变形的逐级跃迁和演化的过程。因此,本研究通过试验研究裂纹扩展过程及宏观蠕变变形规律,结合岩体的非均匀性进行砂岩蠕变破裂机理的多尺度分析,给出岩石多尺度蠕变破裂演化机理,为预防、控制蠕变灾害的发生提供理论基础。

1 砂岩蠕变破裂宏观演化试验与结果

1.1 试样介绍和试验系统

试验试样取自于四川省自贡市,将岩石切割、打

磨、加工成 ϕ50 mm × 100 mm 的标准圆柱形试样，并保证所加工的试样两端面的平行度及光滑程度均满足试验要求。试样为白砂岩，表面光滑，无明显裂纹。本次试验共设置 3 组砂岩试样，每组 3 个试样。试样如图 1 所示。单轴压缩试验测得其瞬时抗压强度为 36.9 MPa，弹性模量为 5.43 GPa。



图 1　砂岩试样

Fig. 1　Sandstone sample

本次试验仪器包括试验机、图像采集设备、应变采集设备和控制计算机，该蠕变试验装置（图 2）最大试验力 2 000 kN，变形测量精度为 ±0.5%，完全满足试验要求。试验时，通过 MTS 伺服试验机施加轴向载荷，采用数字图像设备记录加载过程中表面裂纹萌生和扩展情况，采样频率为 0.3 ~ 0.5 张/s。试验机记录加载过程中轴向应变时程曲线，采用应变仪记录单轴压缩径向应变时程曲线。



图 2　试验系统

Fig. 2　Experiment system

1.2　试验方案

在蠕变试验过程中采用分级加载的方式，加载速率 0.2 MPa/s，第一级载荷为 20 MPa，分级加载的载荷增量为 5 MPa（即 20、25、30、33 MPa）共 4 级进行分级蠕变试验，当蠕变增量为零（低应力）或蠕变速率为常数（高应力）时，认为蠕变稳定，此时可以施加下一级载荷，直至岩样发生破坏。采用 CCD 相机记录表面裂纹萌生和扩展情况，采用动态应变仪记录蠕变过程中径向变形情况，试验机记录蠕变过程中轴向变形情况，同时密切关注试验过程，对载荷的加载时间进行微调。砂岩试验方案如表 1。

表 1　各级加载应力水平

Tab. 1　Loading stress levels at all levels

试样	初级载荷 /MPa	第二级载荷 /MPa	第三级载荷 /MPa	第四级载荷 /MPa
S2-1	20	25	–	–
S2-2	20	25	30	–
S2-3	20	25	30	33

1.3　试验结果

图 3 为 S2-1、S2-2、S2-3 试样在单轴压缩载荷下，应力、轴向应变、径向应变随时间的变化曲线。

由图 3（a）可以看出，S2-1 试样初始应力为 20 MPa，试样发生瞬时轴向应变 3.375×10^{-3} 和径向应变 -1.2×10^{-3} 后，应变变化率非常小。继续增大应力至 25 MPa 时，发生瞬时弹性变形，轴向应变和径向应变瞬时增大。当应力继续保持 25 MPa 不变时，轴向应变缓慢增大，而径向应变变化率较轴向应变大。在 1.7 h 时，S2-1 试样破坏，轴向应变和径向应变瞬时增大，进入蠕变第三阶段。由图 3（b）可以看出，施加初始载荷，应力为 20 MPa 时，试样 S2-2 发生瞬时弹性变形，轴向应变为 6.5×10^{-3}，径向应变为 -0.5×10^{-3}。继续增加载荷至 25 MPa 时，轴向应变和径向应变瞬时增大后基本保持不变。继续增大载荷至 30 MPa 后，变形累积到 3.2 h 时，试样进入第三阶段蠕变，试样发生破坏，从第三级加载阶段来看径向应变率明显大于轴向应变率。由图 3（c）可以看出，分级加载 4 次后，S2-3 试样发生蠕变破坏，在第一、二级载荷时，轴向应变率和径向应变率均非常小，第三级加载后，径向应变率大于轴向应变率，第四级加载后的轴向应变率和径向应变率分别为 $3.74 \times 10^{-4}\,h^{-1}$ 和 $1.54 \times 10^{-3}\,h^{-1}$，径向应变率大

于轴向应变率，在 3.7 h 时发生蠕变破坏，进入第三蠕变阶段。

从图 3 可以看出，随着轴向分级载荷的增加，砂岩的径向等速阶段蠕变速率增加较快，且比同时间段的轴向等速蠕变速率大，如试样 S2-1 在第一级载荷作用下的轴向等速阶段蠕变速率为 $5.38\times10^{-4}h^{-1}$，径向等速阶段蠕变速率 $7.51\times10^{-4}h^{-1}$，在第二级荷载作用下的轴向等速阶段蠕变速率为 $1.0\times10^{-3}h^{-1}$，径向等速阶段蠕变速率 $3.27\times10^{-3}h^{-1}$；试样 S2-2 在第一级载荷作用下的轴向和径向等速阶段蠕变速率分别为 $2.91\times10^{-5}h^{-1}$ 和 $3.42\times10^{-5}h^{-1}$，在第二级载荷作用下的轴向和径向等速阶段蠕变速率分别为 $5.1\times10^{-5}h^{-1}$ 和 $2.58\times10^{-4}h^{-1}$，在第三级载荷作用下的轴向和径向等速阶段蠕变速率分别为 $8.5\times10^{-4}h^{-1}$ 和 $9.2\times10^{-4}h^{-1}$。

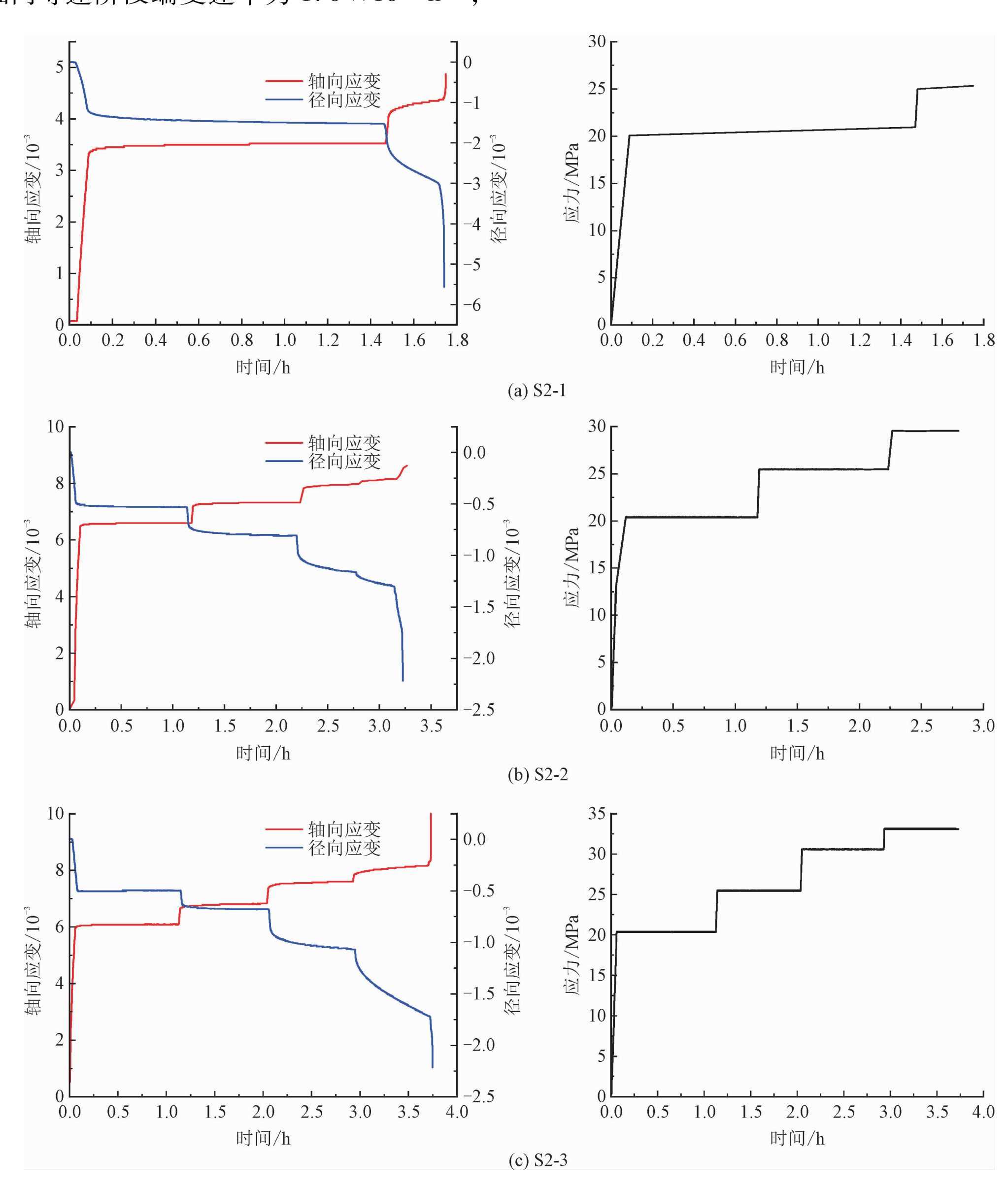


图 3 砂岩应力、轴向应变和径向应变曲线

Fig. 3 Stress, axial strain, and radial strain curve of the sandstone

砂岩蠕变过程存在一个应力阈值，当载荷强度低于应力阈值时，表现出减速蠕变和等速蠕变的特性，当荷载强度高于应力阈值时，轴向应变随时间增长而增大。试样 S2-1、S2-2、S2-3 分别在荷载强度为 25、30 和 33 MPa 时表现出加速蠕变阶段，试样内的孔隙、裂隙不断萌生、扩展、贯通形成宏观变形破坏。

用 CCD 相机采集砂岩蠕变过程中圆柱试样表面图像，选取两组试样，将采集的图像与轴向应变和

径向应变时程曲线进行对比分析。图 4 为砂岩 S2-1、S2-3 试样蠕变破裂演化过程。

由图 4(a)可以看出,在加载时间到 1.5 h 时,试样表面并无明显裂纹,在 1.7 h 时底部出现明显裂纹,之后 15 s 后发生宏观破裂;在第二次加载后,径向应变明显;由图 4(b)可以看出,在宏观破裂面形成(即 3.7 h)之前,半圆柱面表面变化并不明显,未见明显裂纹,这说明蠕变过程中,岩石内部裂纹扩展、连接,形成宏观破裂面之后在试样表面才能观察到。综合图 4(a)、(b)可以看出,砂岩在单轴压缩荷载作用下,产生瞬时弹性应变,在等速蠕变阶段应变变化不明显,试样表面无裂纹,在岩石内部形成微裂纹,随着微裂纹的增加,裂纹逐渐贯通,径向应变相对轴向应变变化明显,裂纹贯通时即进入第三蠕变阶段,轴向应变和径向应变迅速增加,试样最终沿着剪切破裂面滑移破坏。

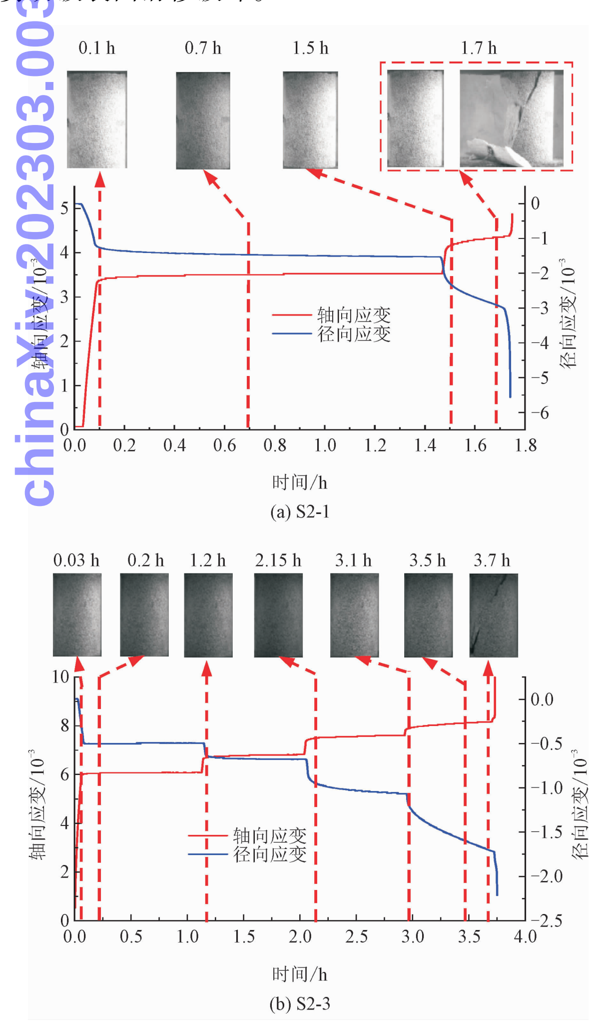


图 4 砂岩蠕变破裂演化过程

Fig. 4 Creep fracture evolution process of sandstone

2 破裂断口微细观扫描与成分分析

2.1 试验仪器及步骤

岩石破裂断口细观扫描主要采用激光共聚焦显微镜。选取典型的单轴压缩蠕变破坏后的砂岩试样 S2-3,对其宏观破坏面进行区域划分,如图 5 所示,采用激光共聚焦显微镜,选取不同放大倍数对断口的细观形貌进行观察,分析断口的破坏特征。采用细观扫描后的试样,将其进行高温干燥,固定在试验台上,采用 JSM7500F 扫描电镜进行微观扫描试验。

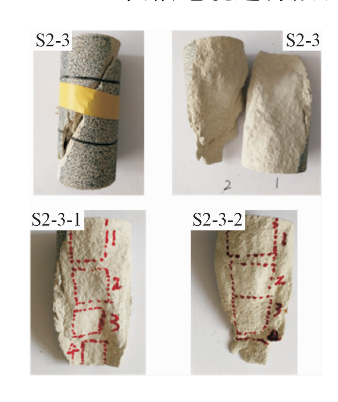


图 5 单轴压缩荷载下砂岩 S2-3 试样断口及分区

Fig. 5 Fracture and division of sandstone S2-3 specimen under uniaxial compression load

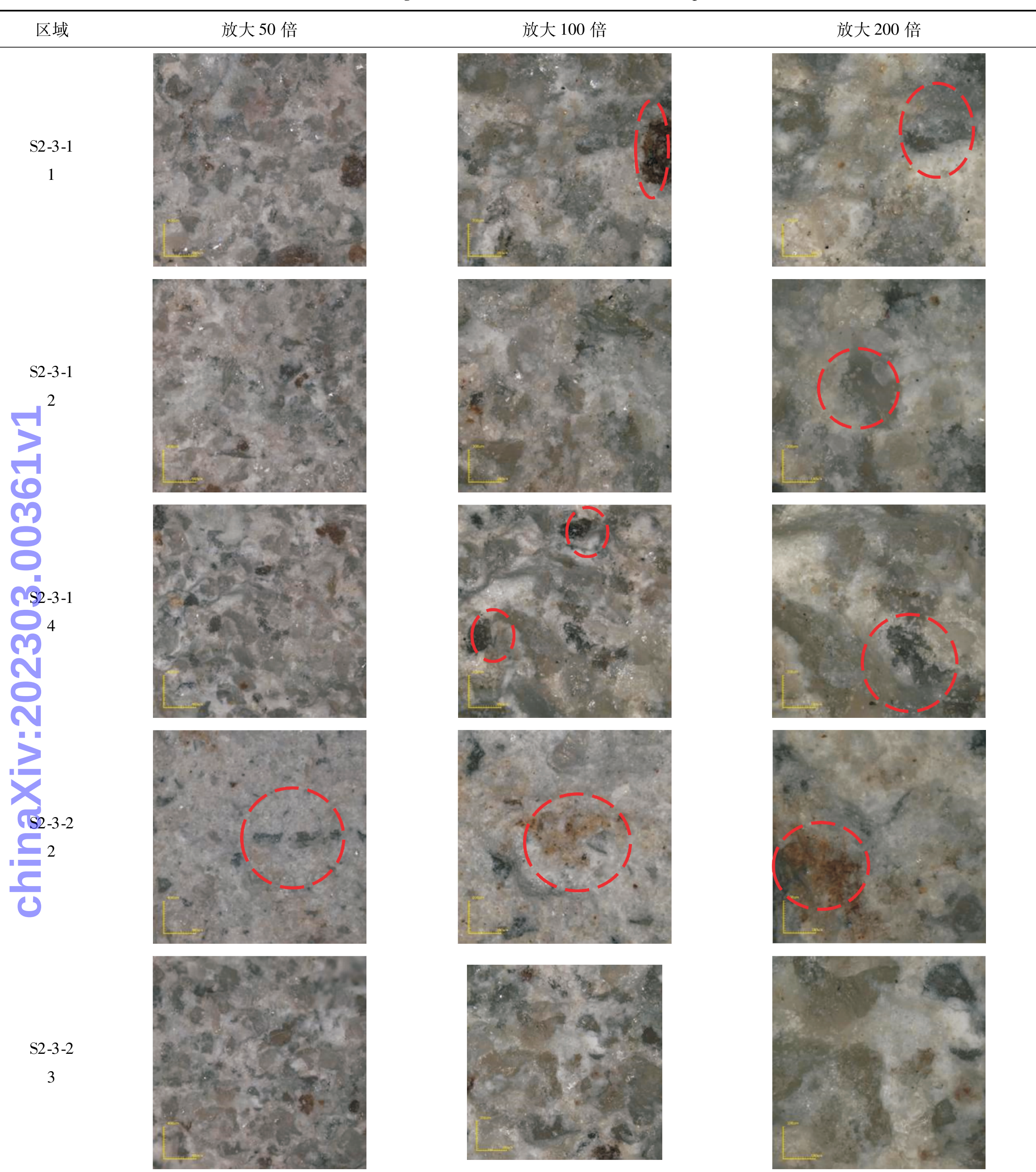
2.2 破裂断口细观结构扫描结果分析

如表 2 所示,砂岩 S2-3 试样断口各区域不同放大倍数下的扫描结果,放大 50 倍时,图中标尺为 400 μm;放大 100 倍时图中标尺为 200 μm;放大 200 倍时图中标尺为 100 μm。

从表 2 可以看出,砂岩由不同物质组成,颗粒粒度较大且分布不均匀,图中不同颜色代表不同的物质。随着放大倍数的增大,可以清楚的看到砂岩颗粒通过胶结物胶结在一起,物质组成及其不均匀。与图 3 对照可以看出,S2-3-1 的 1、2、4 区与 S2-3-2 的 3 区,破裂主要为颗粒或者胶结物的断裂,无明显擦痕,而 S2-3-2 的 2 区,颗粒与胶结物纠缠在一起,发生了明显的二次摩擦且存在高低落差,也是摩擦的痕迹。与图 5 宏观破裂过程对比可以看出,S2-3 试样首先发生颗粒间的断裂,包括拉伸断裂和剪切断裂,对应宏观的初始蠕变阶段和等速蠕变阶段。当裂纹贯通后,沿破裂面发生摩擦,在破裂面局部区域形成明显擦痕。

表 2 砂岩 S2-3 各区域不同放大倍数扫描结果

Tab. 2 Different magnification scan results of sandstone specimen S2-3



区域	放大 50 倍	放大 100 倍	放大 200 倍
S2-3-1 1			
S2-3-1 2			
S2-3-1 4			
S2-3-2 2			
S2-3-2 3			

2.3 破裂断口微观结构扫描结果分析

图 6 为砂岩破裂断口扫描结果，左侧图片放到 500 倍，右侧图片放大 2 000 倍。从图中可以看出，砂岩颗粒较大，当放大倍数为 500 时可以观察到局部矿物颗粒和裂隙，当放大 2 000 倍及以上时可以看到矿物颗粒与胶结物的胶结情况。砂岩颗粒较大，内部比较密实，原生缺陷和孔隙分布于胶结物中。裂隙较大，可能为衍生裂隙。在局部缺陷区或者胶结物与颗粒的交界处，产生局部变形。结合细观和宏观的观察结果，对于砂岩破裂主要沿胶结物与颗粒边界或者胶结物发生断裂。

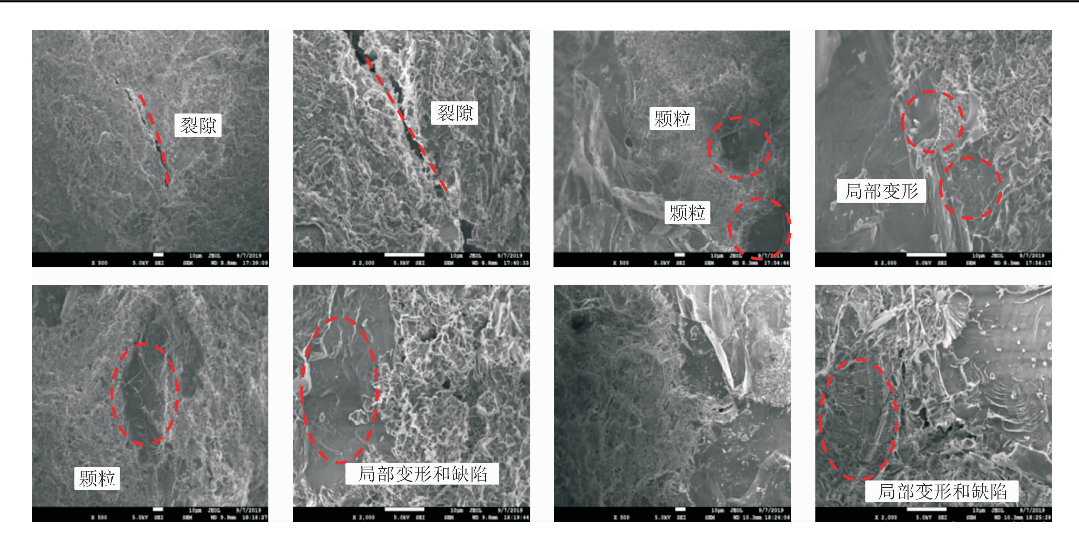


图 6　单轴压缩荷载下砂岩破裂断口扫描结果

Fig. 6　Sandstone fracture section scan results loading on the uniaxial compression

2.4　砂岩组成成分分析

采用 X 射线荧光分析仪(XRF)和 X 射线衍射仪(XRD)对砂岩试样进行组成成分分析。

如图 7 所示,为砂岩试样组成成分图,图中 Q 指石英,K 指高岭石。在入射角 16°时,石英衍射强度最大,表明砂岩中石英含量较高。结合 XRF 荧光分析仪结果,石英含量较高为 70%,高岭石含量较低为 30%。

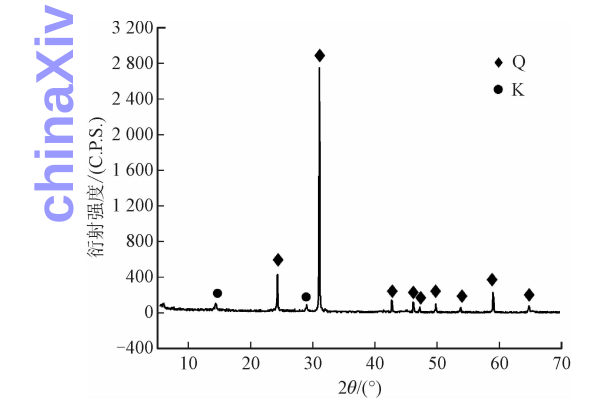


图 7　砂岩试样组成成分

Fig. 7　Sandstone specimen compositions

2.5　砂岩破裂断口元素特征分析

图 8 为砂岩断口放大 5 000 倍扫描结果,选取 6 个分析点位进行元素重量百分比和原子百分比分析。点位的选取为特殊形状颗粒或者裂隙、孔隙的边缘。点位 1、4、6 位于片状颗粒中心,点位 2、5 位于团簇状颗粒中心,点位 3 位于孔隙边缘。从图中可以看出,颗粒形状主要为团簇状和鳞片状,且含有原生孔隙和裂隙。

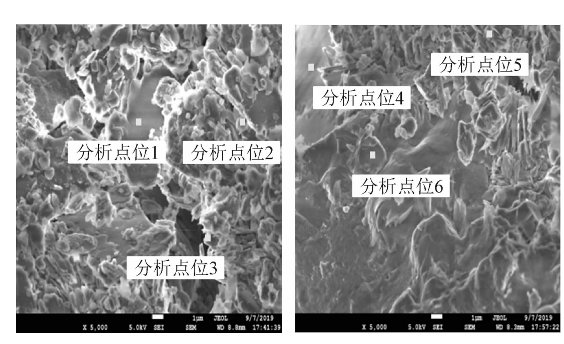


图 8　砂岩破裂断口元素分析点位

Fig. 8　Element analysis point of sandstone fracture section

表 3　砂岩不同分析点位元素重量百分比(单位:%)

Tab. 3　Weight percentage of sandstone different analysis point element (unit:%)

元素	分析点位 1	分析点位 2	分析点位 3	分析点位 4	分析点位 5	分析点位 6
O	54.17	57.10	58.59	60.33	61.15	58.92
Si	22.68	21.57	20.92	25.40	19.47	33.14
Al	21.93	20.37	19.84	13.46	18.51	7.06
K	0.40	0.13	–	0.46	–	0.87
Fe	0.83	0.82	0.66	0.35	0.86	–

表 3 和表 4 为砂岩各分析点位元素重量百分比和原子百分比,从表中可以看出,分析点位 1、2、4 元素主要是 O、Si、Al,并含少量 K 和 Fe;分析点位 3、5 元素主要是 O、Si、Al,同时含少量 Fe;分析点位 6 元素主要是 O 和 Si,Al 含量较少,同时含极少量 K,不含 Fe。

表 4　砂岩不同分析点位元素原子百分比(单位:%)

Tab. 4　Atomic percentage of sandstone different analysis point elements (unit:%)

元素	分析点位 1	分析点位 2	分析点位 3	分析点位 4	分析点位 5	分析点位 6
O	67.30	69.84	71.06	72.63	73.27	71.55
Si	16.05	15.03	14.45	17.42	13.29	22.93
Al	16.15	14.78	14.26	9.61	13.15	5.08
K	0.20	0.07	–	0.23	–	0.43
Fe	0.29	0.29	0.23	0.12	0.30	–

采用能谱仪对微观特殊点进行了能谱分析,结合 XRD 和 XRF 的分析结果可以看出,不同点组成元素不同,所对应矿物物质不同,这也反映了砂岩组成成分的非均匀性。

岩石的非均匀性是发生蠕变破裂演化的根源,非均匀性具有尺度特性,随着裂纹的逐渐发展,岩石的非均匀性也随时间发生变化。从系统科学的角度,这又是一个反馈的过程。在减速蠕变阶段,裂纹分布趋于均匀,宏观非均匀程度降低,属于负反馈阶段,但是在微观,裂纹萌生属于正反馈;在等速蠕变阶段,裂纹扩展、连接,宏观处于临界反馈状态;在加速蠕变阶段,变形迅速增大,属于正反馈阶段。从微细观裂纹扩展角度,则一直处于正反馈状态。

3　讨　论

基于分级载荷作用下砂岩的蠕变破裂特征,对岩石的蠕变破裂过程裂纹扩展规律、岩石蠕变破裂尺度特性进行如下讨论。

1)岩石蠕变破裂的实质是微观裂纹萌生、细观裂纹扩展、连接、贯通在宏观的表现[18]。在初始蠕变阶段,裂纹随机产生,弥散性分布,随着裂纹的增加,宏观趋于均匀,宏观变形速率减小;在等速蠕变阶段,裂纹在某一优势方向扩展、连接,宏观变形稳定增大,变形速率保持不变;在加速蠕变阶段,沿宏观破裂面形成宏观破裂带,并发生摩擦滑动,变形迅速增大,变形速率也迅速增加。

2)岩石的变形和破裂具有尺度特性[19-21]。在外载荷的作用下,岩石首先在微观产生破裂和变形,累积迭加。当裂纹长度超过 0.01 mm 时,跃迁至细观尺度。在细观尺度下,微观跃迁的裂纹或者细观缺陷使得岩石细观非均匀,细观尺度的非均匀驱动作用下,裂纹继续扩展,扩展的裂纹加剧岩石的非均匀性,裂纹长度累积。当裂纹长度超过 1 mm 时,跃迁至宏观尺度。在宏观尺度上,各裂纹继续扩展,并相互连接、贯通,宏观裂纹长度越长,岩石的非均匀性更大,进一步促进裂纹的连接和贯通。当裂纹从试样的一侧贯通后到达另一侧,岩石发生宏观失稳破坏。

不论是微观破裂还是细观裂纹扩展,在宏观的表现为蠕变变形。因此,蠕变变形的减速蠕变阶段、稳定蠕变阶段主要为微观破裂和细观裂纹扩展,加速蠕变阶段,宏观裂纹贯通,岩石失稳破坏。当微细观裂纹并未贯通则不会出现蠕变的加速蠕变阶段。

4　结　论

本研究从宏观演化试验和破裂断口微细观结构特征扫描试验出发,分析实验现象,得出如下结论。

1)岩石的非均匀性包括组成成分非均匀和结构非均匀。组成成分非均匀体现在不同点组成元素不同,对应的矿物质组成也不相同;结构非均匀是岩石内部包含各种微孔隙和微裂隙。

2)岩石蠕变破裂的演化机理是岩石非均匀性引起的微观裂纹萌生、细观裂纹扩展至宏观裂纹贯通的多尺度逐级跃迁和自组织的反馈过程。

参考文献:

[1] 杨蔚为,郑永来,邓树新. 单元体弹性模量分布对岩石单轴抗压强度影响数值模拟[J]. 长江科学院院报,2014,31(9):84-87.
YANG Weiwei,ZHENG Yonglai,DENG Shuxin. Numerical simulation on the effect of element's elasticity modulus distribution on uniaxial compressive strength of rock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2014,31(9):84-87(in Chinese).

[2] 刘传孝,蒋金泉,刘福胜,等. 岩石材料微、细、宏观断裂机理尺度效应的分形研究[J]. 岩土力学,2008,29(10):2619-2622.
LIU Chuanxiao,JIANG Jinquan,LIU Fusheng,et al. Fractal study of scale effect in microscopic,mesoscopic and macroscopic states for fracture mechanism of rock materials[J]. Rock and soil mechanics,2008,29(10):2619-2622(in Chinese).

[3] YU M P,CHEN J H,WU D G,et al. A finite-difference-based multiscale approach for electromagnetic digital rock modeling[J]. IEEE journal on multiscale and multiphysics computational techniques,2018,3:66-73.

[4] 于庆磊,杨天鸿,郑超,等. 岩石细观结构对其变形强度影响的数值分析[J]. 岩土力学,2011,32(11):3468-3472.
YU Qinglei,YANG Tianhong,ZHENG Chao,et al. Numerical anal-

ysis of influence of rock mesostructure on its deformation and strength[J]. Rock and soil mechanics,2011,32(11):3468-3472 (in Chinese).

[5] 丛宇. 卸荷条件下岩石破坏宏细观机理与地下工程设计计算方法研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2014.

[6] 彭超. 岩质边坡宏细观力学特性及开挖稳定性分析与控制研究[D]. 北京:北京科技大学,2018.

[7] WEIBULL W A. Statistical theory of the strength of materials [C]//Proceedings of Royal Swedish Institute Engineering Researching Stockholm. [S. l.]:[s. n.],1939:1-50.

[8] 沃尔科夫 C Д. 强度统计理论[M]. 吴学蔺,译. 北京:科学出版社,1965.

[9] 宋义敏,张悦,许海亮,等. 基于非均匀特征的岩石蠕滑与黏滑变形演化研究[J]. 岩土力学,2020,41(2):363-371.
SONG Yimin,ZHANG Yue,XU Hailiang,et al. Study on creep-slip and stick-slip deformation evolution of rock based on non-uniform characteristics[J]. Rock and soil mechanics,2020,41(2):363-371(in Chinese).

[10] 赵娜,王来贵,于永江. 基于内动力的非均匀岩石材料Ⅰ型断裂扩展过程分析[J]. 煤炭学报,2015,40(7):1512-1517.
ZHAO Na,WANG Laigui,YU Yongjiang. Propagation process analysis of Ⅰ type fracture on non-uniform rock based on internal motive force[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(7):1512-1517(in Chinese).

[11] 于庆磊,唐春安,唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):551-559.
YU Qinglei,TANG Chunan,TANG Shibin. Digital image based characterization method of rock′s heterogeneity and its primary application[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2007,26(3):551-559(in Chinese).

[12] 刘建,赵国彦,梁伟章,等. 非均匀岩石介质单轴压缩强度及变形破裂规律的数值模拟[J]. 岩土力学,2018,39(增刊1):505-512.
LIU Jian,ZHAO Guoyan,LIANG Weizhang,et al. Numerical simulation of uniaxial compressive strength and failure characteristics in nonuniform rock materials[J]. Rock and soil mechanics,2018,39(S1):505-512(in Chinese).

[13] 尹崧宇,赵大军,周宇,等. 超声波振动下非均匀岩石损伤过程数值模拟与试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2017,47(2):526-533.
YIN Songyu,ZHAO Dajun,ZHOU Yu,et al. Numerical simulation and experiment of the damage process of heterogeneous rock under ultrasonic vibration[J]. Journal of Jilin University(earth science edition),2017,47(2):526-533(in Chinese).

[14] 赵延林,曹平,陈沅江,等. 分级加卸载下节理软岩流变试验及模型[J]. 煤炭学报,2008,33(7):748-753.
ZHAO Yanlin,CAO Ping,CHEN Yuanjiang,et al. Creep properties experiment and model of jointed soft rocks under step load and unload[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(7):748-753(in Chinese).

[15] ZHANG L Y,MAO X B,LIU R X,et al. The mechanical properties of mudstone at high temperatures:An experimental study[J]. Rock mechanics and rock engineering,2014,47(4):1479-1484.

[16] 刘东燕,赵宝云,刘保县,等. 深部灰岩单轴蠕变特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(4):33-37.
LIU Dongyan,ZHAO Baoyun,LIU Baoxian,et al. Uniaxial experimental analysis on creep properties of deep limestone[J]. Journal of civil,architectural & environmental engineering,2010,32(4):33-37(in Chinese).

[17] 贺其. 红砂岩单轴加卸载蠕变特性试验研究[D]. 抚州:东华理工大学,2016.

[18] 唐春安,刘红元,秦四清,等. 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响[J]. 地球物理学报,2000,43(1):116-121.
TANG Chunan,LIU Hongyuan,QIN Siqing,et al. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock[J]. Chinese journal of geophysics,2000,43(1):116-121(in Chinese).

[19] 张艳博,张恩源,孙林,等. 不均质性对岩石破裂过程的影响实验研究[J]. 矿业研究与开发,2019,39(9):70-75.
ZHANG Yanbo,ZHANG Enyuan,SUN Lin,et al. Experimental study on the effect of heterogeneity on rock failure process[J]. Mining research and development,2019,39(9):70-75(in Chinese).

[20] SUN J,HUY Y. Time-dependent effects on the tensile strength of saturated granite at Three Gorges Project in China[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,1997,34(3/4):306. e1-306. e13.

[21] 吕兆兴,冯增朝,赵阳升. 岩石的非均质性对其材料强度尺寸效应的影响[J]. 煤炭学报,2007,32(9):917-920.
LÜ Zhaoxing,FENG Zengchao,ZHAO Yangsheng. Influence of rock inhomogeneity on strength-size effect of rock materials[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(9):917-920.

（编辑　史淑英）